

Redes Neurais Aplicadas na Separação de Partículas em Calorímetros Cintilantes

R. Rajagopal, J. M. Seixas e L. P. Calôba

COPPE/EE/UFRJ, CP 68504, Rio de Janeiro 21945 – 970 Brazil

E-mails: ram.rajagopal@natinst.com, seixas@lps.ufrj.br, caloba@lps.ufrj.br

Abstract

A neural particle discriminator is developed for a high-energy scintillating fiber calorimeter, a detector that measures the energy of incoming particles. This fine-grained detector provides a detailed information on the energy deposition profiles in terms of both digitized time signals (longitudinal information) and readout energy absorbed on each calorimeter cell (radial information). The designed discriminator achieves high efficiency in identifying electrons and pions when trained on experimental data sets and performance is essentially independent of the beam energy and impact point. Comparisons with classical discriminating methods in the field are also provided.

1. Introdução

1.1. Calorímetros e Coleta de Dados

Calorímetros ou sensores de absorção total são detectores utilizados em experimentos de física de partículas. O calorímetro consiste basicamente de um bloco de matéria com a qual a partícula a ser detectada interage depositando toda sua energia. O processo de deposição é tal que são formadas cascatas de partículas de energia mais baixa e uma pequena fração da energia inicial da partícula é transformada em um sinal detectável. Diferenças no padrão de deposição de energia devido às formas de cascatas desenvolvidas pelas partículas permitem a identificação dos eventos. No ambiente de física de partículas é necessária a discriminação on-line dos eventos gerados num experimento, pois a alta taxa de eventos gerados torna inviável o armazenamento para posterior análise.

Existem dois tipos de cascatas: cascatas eletromagnéticas e cascatas hadrônicas [1]. Devido à natureza da interação das partículas, as cascatas eletromagnéticas têm pouca penetração no calorímetro, caracterizando um sinal mais rápido e uma distribuição de energia mais concentrada, quando comparadas às cascatas hadrônicas. As cascatas eletromagnéticas caracterizam os elétrons e as hadrônicas, os pions. Na Fig. 1 podemos observar distribuições típicas de energia para elétrons e pions que interagiram com o calorímetro utilizado neste trabalho.

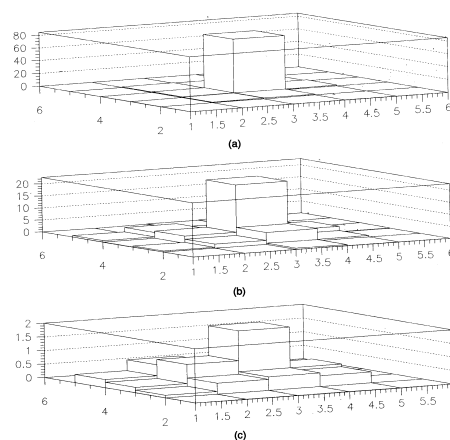


Figura 1: (a) Elétron : Seção EM; (b) Píon : Seção EM; (c) Píon : Seção Hadrônica. Energia 40 Gev

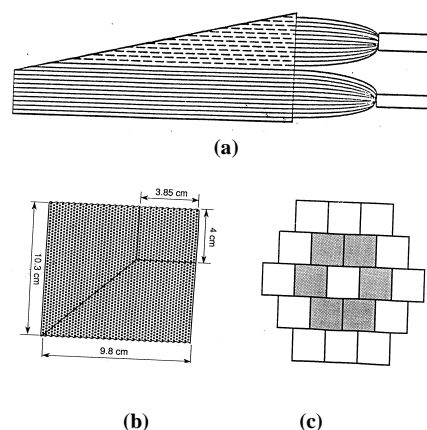


Figura 2: Calorímetro: Módulo (a) Vista Lateral, (b) Vista Superior, (c) Disposição dos Módulos

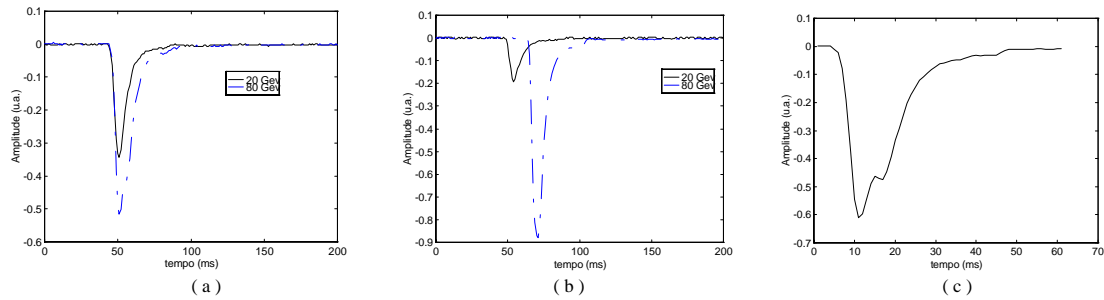


Figura 3: (a) Elétrons; (b) píons; (c) ampliação de um píon de duplo pico

Foi desenvolvido no CERN um calorímetro projetivo de fibras óticas cintilantes. A fibra cintilante foi escolhida para ser o material ativo porque ela é capaz de conduzir rapidamente os sinais, além de permitir uma maior homogeneidade nos mesmos, pois a perda do sinal propagado é reduzida. Ao ser atravessada por uma partícula, a fibra se excita produzindo um sinal luminoso que é por ela conduzido até ser detectado por um detector de luz (tubos fotomultiplicadores, para o calorímetro em questão) e transformado em pulso elétrico.

O calorímetro é composto de módulos com fibras acomodadas em uma matriz de chumbo. Em cada módulo todas as fibras que vão até a face frontal formam a seção eletromagnética, e as fibras restantes formam a seção hadrônica [Fig. 2]. Cada uma destas seções é lida por um tubo fotomultiplicador. Todas as fibras da seção eletromagnética e as duas primeiras da seção hadrônica são espelhadas na sua ponta que não se encontra ligada ao tubo fotomultiplicador. A face frontal de cada módulo tem aproximadamente 4 x 4 cm, e a face traseira com tamanho 10 x 10 cm aproximadamente. Os módulos têm 200cm de profundidade [2].

Neste trabalho estudamos a aplicação de redes neurais para a discriminação de elétrons e píons com base na informação produzida pelo calorímetro de fibras cintilantes. Para a coleta de dados deste estudo, foram realizados testes com alvo fixo onde são lançados feixes de partículas (elétrons e píons) no calorímetro. A configuração dos módulos foi em forma de uma parede de tijolos [Fig. 2c]. Os testes foram realizados com feixes de elétrons e píons de diversas energias (20, 40 e 80 GeV foram escolhidos para utilização neste estudo), incidindo em diferentes posições do calorímetro (por exemplo, no módulo central, na junção de dois módulos, etc).

Os sinais do calorímetro ao saírem dos tubos fotomultiplicadores são divididos e vão para ADCs (Conversor Analógico Digital) de carga e para um somador linear rápido [3]. O sinal resultante é então enviado para um osciloscópio digital, usando-se para tal um cabo rápido de modo a evitar distorções nos sinais rápidos do detector. Assim, os sinais adquiridos para cada evento são:

- Os pulsos com 201 amostras gerados pelo osciloscópio digital, que recebem a denominação de sinais longitudinais;
- Os sinais provenientes dos ADCs de carga, que representam a energia armazenada na parte eletromagnética e hadrônica de cada módulo;

Pulsos longitudinais de píons são mais largos que aqueles de elétrons [Fig. 3], refletindo o que acontece no caso dos sinais radiais de energia, que apresentam distribuições menos concentradas para píons [Fig 1]. Quanto maior a energia (Gev) maior o pico do sinal para elétrons e píons [Fig. 3]. Para energias baixas píons e elétrons se tornam bastante parecidos, ou seja, quanto menor a energia maior o erro de discriminação. Podemos observar também na [Fig. 3c] píons de duplo pico formados devido à reflexão da luz na ponta espelhada das fibras.

Os sinais a serem detectados foram escolhidos como sendo o sinal resultante da soma dos sinais dos sete módulos mais internos ou apenas de três mais internos, no caso longitudinal. No caso radial, a energia depositada em cada célula foi utilizada. A restrição no total de energia amostrada para o caso longitudinal não chega a ser dramática, pois elétrons depositam praticamente toda a sua energia num único módulo, enquanto que píons depositam cerca de 90% da sua energia total na região definida pelos sete módulos interiores.

1.2. Pré-processamento nos Sinais (Sinais Longitudinais)

Os pulsos de elétrons e píons foram normalizados em amplitude. Foram realizados alguns pré-processamentos de forma a observar se poderiam produzir melhorias na discriminação desejada de partículas, incluindo a compensação do cabo de sinal e corte da linha de base dos pulsos.

A compensação do cabo de sinal é importante, já que o tempo de resposta do cabo é da ordem do sinal (rise time 2ns) e as diferenças entre pulsos de elétrons e píons são muito sutis. Deste modo, uma redução na banda passante do sistema de aquisição dos sinais originais pode prejudicar a discriminação das partículas.

A eliminação da linha de base do pulso foi realizada utilizando-se uma janela de 60ns que é disparada no instante em que atinge-se 10% do pico do sinal. Com isso os pulsos passaram a ser representados por estas 60 amostras significativas, ao invés das 201 anteriores, diminuindo-se o nível de ruído apresentado a rede.

1.3. Pré-processamento nos Sinais (Sinais Radiais)

O sinal radial (ou de energia) consiste da informação da energia armazenada nas partes eletromagnética e hadrônica [Fig. 1] de cada módulo do calorímetro (como o calorímetro possui 19 módulos, o sinal radial possui 38 pontos). Os sinais foram normalizados pela energia total armazenada no calorímetro para cada evento.

Também é interessante observar a distribuição da energia de eventos típicos de elétron e pión nas seções eletromagnética e hadrônica do calorímetro. Na [Fig. 1] podemos ver que um elétron típico deposita toda sua energia na seção eletromagnética (no evento apresentado não havia nenhuma energia na seção hadrônica) e de forma concentrada, enquanto que um pión típico deposita energia tanto na seção eletromagnética, quanto na seção hadrônica e de uma forma mais distribuída.

1.4. Redes Neurais

A rede foi simulada utilizando-se o pacote JetNet [5]. Ela consistiu de três camadas, com um neurônio na camada de saída. A função não linear escolhida foi a tangente hiperbólica. Caso o evento seja um elétron a saída idealmente deverá ser -1 e caso seja um pión, +1.

A rede é do tipo *feed-forward* e *full-connected*. A rede foi treinada por *backpropagation*, sendo o critério de parada utilizado o da máxima eficiência de discriminação.

2. Análise dos Resultados

Inicialmente determinou-se, através de testes de desempenho para ambos os casos radial e longitudinal, o valor de 0,01 para o coeficiente de aprendizado, o qual se manteve fixo ao longo do treinamento.

Os efeitos da variação no número de atualizações por época no desempenho da rede se mostraram significativos. Testes foram realizados com uma época reduzida (2) e com aquela correspondente a uma amostragem completa do conjunto de treinamento. Enquanto que para o caso longitudinal a época de maior valor produziu o melhor resultado, para o caso radial o desempenho foi melhor com a época reduzida [Tab. 1]. Como um pulso longitudinal contém 201 amostras, enquanto que o radial contém 38, o treinamento com época grande ajudou no primeiro caso, e provocou uma especialização em demasia no segundo.

Tabela 1: Resultados de discriminação, em função da época e do corte da linha de base (veja o texto)

Época	Dados Longitudinais (40 GeV, posição central)		Dados Radiais (40 GeV, posição 8)	
	Efic.(e)	Erro (p)	Efic.(e)	Erro (p)
2	99.5 %	0.3 %	99.7 %	0.5 %
1490	99.5 %	0.1 %	99.3 %	0.5 %
2 (corte)	99.6 %	0.3 %	-----	-----
1490 (corte)	99.6 %	0.1 %	-----	-----

Estudou-se também o efeito da compensação e dos cortes sobre a resposta da rede para pulsos longitudinais. A resposta para pulsos com o corte é um pouco melhor do que a resposta sem o corte [Tab. 1,2], o que já era esperado, pois o corte elimina amostras da linha de base que se encontram associadas ao ruído inerente ao calorímetro e ao seu sistema de aquisição.

Tabela 2: Elétrons e píons, 40 GeV posição central

Dados Longitudinais	Efic. (e)	Erro (p)
Não filtrados e sem corte	99.6 %	0.3 %
Não filtrados e com corte	99.6 %	0.1 %
Filtrados e sem corte	99.6 %	0.3 %
Filtrados e com corte	99.6 %	0.1 %

O efeito da filtragem de compensação na performance da rede pode ser observado na [Tab. 2]. Quando os pulsos têm os efeitos de distorção do cabo compensados, o desempenho da rede não se altera. Assim, a rede mostra uma certa capacidade de filtragem, fazendo com que este pré-processamento seja desnecessário.

A [Tab. 3] resume o resultado obtido para diferentes variáveis de discriminação, níveis de energia e pontos de impacto. São analisadas as eficiências de classificação correta para elétrons e o conseqüente erro na classificação de píons (o falso alarme) das seguintes variáveis de discriminação: soma total (incluindo as seções eletromagnética e hadrônica) dos sete módulos mais internos (14 canais de leitura somados), a soma destes mesmos módulos mais internos, restringindo-se apenas à seção hadrônica (soma de 7 canais de leitura), e a soma dos 3 módulos mais internos (6 canais somados, considerando-se ambas seções do detector). Também foram considerados diferentes pontos de impacto do feixe de partículas, incluindo o centro do módulo central do arranjo experimental (posição 13), o centro do seu vizinho à direita (posição 8), e a fronteira entre o módulo central e seus vizinhos abaixo e à esquerda (posição 9).

Tabela 3: Resultados da Discriminação Neural

Dados Longitudinais				
Energia GeV	Posição	Var.	Ef. (e) %	Erro (p) %
80	13	$\Sigma 7$ total	100	0.2
40	13	$\Sigma 7$ total	100	0.0
40	8	$\Sigma 7$ em	97.0	0.3
40	9	$\Sigma 7$ em	97.8	0.0
20	13	$\Sigma 7$ total	97.0	3.5
20	13	$\Sigma 3$ total	97.0	8.6
20	7	$\Sigma 7$ total	97.0	0.7
20	7	$\Sigma 3$ total	97.0	3.8
Dados Radiais				
Energia GeV	Posição	Ef. (e) %	Erro (p) %	
80	13	100	0.2	
40	13	100	0.0	
40	8	97.0	0.1	
40	9	99.7	0.0	
20	7	99.7	0.0	
20	7	97.0	1.0	

Como podemos observar analisando esta tabela, o desempenho na discriminação decresce levemente com a energia, tanto para o caso radial quanto para o longitudinal. Isto é de se esperar, pois a energias mais baixas, os píons se assemelham ainda mais aos elétrons.

Também podemos notar que o desempenho varia significativamente com a variável de discriminação, no caso longitudinal. À medida que o pulso de entrada contém menos informação (caso da soma de 3 células e da soma restrita à seção eletromagnética), a discriminação piora. Portanto, a melhor variável de discriminação, neste caso, é a soma total dos 7 módulos interiores.

Por fim, a discriminação é sensível à posição (ou seja, o ponto no detector no qual o feixe é incidido). Posições supostamente privilegiadas, como a central (13), apresentam um desempenho levemente superior em relação àquelas em que possíveis não-homogeneidades do detector tendem a tornar a discriminação mais difícil, como a junção dos módulos (9).

Outro resultado muito importante, que pode ser observado, é que a rede desempenha melhor com dados radiais, que com dados longitudinais.

É importante ressaltar que, apesar do desempenho da rede neural depender rigorosamente da energia do feixe, um único patamar, independente da energia, pode ser utilizado para o processo de discriminação das partículas. Este fato torna o processamento neural extremamente interessante para utilização em tempo real, já que produz um discriminador virtualmente independente da energia e do ponto de impacto do feixe.

2.1. Comparação com Métodos Tradicionais

Os resultados obtidos pela rede são melhores que todos os resultados para métodos tradicionais como filtragem pela largura dos pulsos ou a discriminação por lateral shower [2]. A [Tab. 4] corresponde a resultados obtidos para um calorímetro de fibras semelhante ao analisado neste trabalho, mas não-projetivo. Devido às diferentes seções que oferece, os resultados de discriminação tendem a ser melhores para o calorímetro projetivo, em relação ao não-projetivo. Entretanto a melhora esperada não é tão significativa, a ponto de atingir-se os níveis de performance do classificador neural. Portanto, a comparação com os resultados acima é bastante favorável ao processamento neural.

Tabela 4: Resultados para métodos clássicos com elétrons e píons de 40 GeV, posição 13 [4]

Tipo de Discriminação	Acertos em elétrons	Erros em píons
Pré-shower	96.9 %	7.8 %
Lateral Shower	95.2 %	0.1 %
Largura de pulsos	100 %	1.6 %

Podemos ainda comparar os resultados dos pulsos de 80 GeV (pos. 13) com resultados de dois tipos de discriminadores projetados para o mesmo calorímetro projetivo, testados com eventos de 80 GeV (pos. 13): a discriminação baseada na razão Ehad/Eem e na ação conjugada do uso da razão Ehad/Eem com o cálculo da largura efetiva da cascata (Rp) [2].

A discriminação Ehad/Eem consiste em dividir a energia obtida na parte hadrônica dos módulos do calorímetro pela energia obtida na parte eletromagnética. Quando a partícula for um elétron, por exemplo, o resultado da razão Ehad/Eem vai estar próximo de zero, pois o elétron deixa muito pouca energia na parte hadrônica. Para píons, a razão Ehad/Eem vai ter um resultado diferente de zero.

Tabela 5: Resultados para pulsos de 80 GeV. [2]

Tipo de discriminação	Acertos em Elétrons	Erros em píons
Ehad/Eem	95%	0.3%
Rp+Ehad/Eem	95%	0.1%

A outra técnica de discriminação utilizada para o calorímetro projetivo de fibras cintilantes é a associação dos métodos da largura efetiva da cascata com a discriminação por Ehad/Eem. A largura efetiva (Rp) é a soma dos resultados da multiplicação da energia contida em cada região do calorímetro pela sua distância ao baricentro da cascata, utilizando-se a energia total absorvida pelo detector como fator de normalização.

Assim, elétrons possuem um R_p pequeno e píons um R_p maior.

Tabela 6: Resultados para pulsos de 20 Gev. [2]

Tipo de discriminação	Acertos em elétrons	Erros em píons
Ehad/Eem	92%	4%

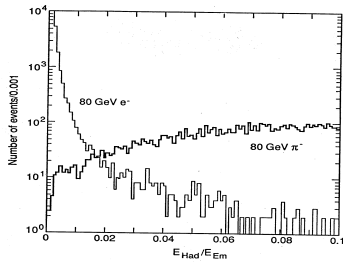


Figura 4: Distribuições para a discriminação por Ehad/Em [2]

Observando as distribuições dos métodos acima [Figs. 4, 5] e a da rede neural [Fig. 6], percebemos uma separação bem mais clara no caso do processamento neural.

Na [Fig. 7], podemos observar a curva de desempenho do classificador neural, mostrando-se a eficiência de discriminação para elétrons e o erro de classificação para píons. Esta curva é obtida variando-se o patamar de discriminação das distribuições de elétrons e píons à saída da rede neural. Na prática, este patamar de discriminação é ajustado de acordo com a finalidade do experimento.

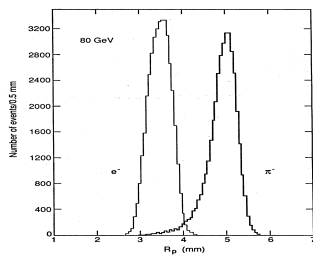


Figura 5: Distribuições para o mapeamento R_p [2]

Pela [Tab. 5] podemos ver que o desempenho da rede para 80 Gev (posição 13) foi bem superior ao obtido pelos métodos clássicos descritos. Também em relação aos eventos de 20 GeV, o discriminador neural apresenta melhores resultados em relação ao cálculo da razão Ehad/Eem, conforme atesta a [Tab. 6].

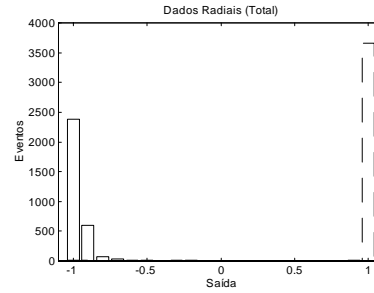


Figura 6: Distribuição de Saídas da Rede (Radial Total)

2.2. Estudo em Relação à Generalização

Foi realizada uma avaliação quanto ao desempenho da rede para dados concatenados, ou seja, formando-se conjuntos de treinamento e teste que englobam eventos de diferentes energias e pontos de impacto [Tab. 7]. Como podemos observar, o classificador neural consegue uma performance de alta qualidade, confirmando que o discriminador pode operar independentemente da energia e do ponto de impacto do feixe de partículas.

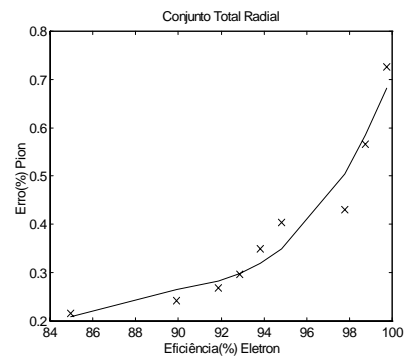


Figura 7: Eficiência

Tabela 7: Dados Radiais Concatenados

Dados Longitudinais			
Gev	pos	Efic.(e)	Erro (p)
20	13, 7	97.0%	1.5%
40	8, 9, 13	97.0%	0.1%
20,40,80	13	97.0%	0.8%
20,40,80	Todos	-----	-----
Dados Radiais			
Gev	pos	Efic.(e)	Erro(p)
20	13, 7	97.0%	1.1%
40	8, 9, 13	97.0%	0.0 %
20,40,80	13	97.0%	0.5%
20,40,80	Todos	97.0%	0.4%

3. Conclusões

Do ponto de vista do desempenho, a rede neural realizou com sucesso o seu papel de separador de elétrons e píons para calorímetros projetivos de fibras

Ela superou, em termos de performance, os sistemas tradicionais de identificação utilizados em calorimetria.

Algumas vantagens do uso de redes neurais como sistema de identificação de partículas para a calorimetria podem ser enunciadas a partir deste trabalho:

- A rede consegue desempenhar muito bem o papel de filtro de compensação das distorções introduzidas pelos cabos de transmissão de sinais;
- A rede é capaz de uma boa identificação, independente da energia e da posição de impacto;

4. Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer o apoio a este trabalho provido pelo CNPq e FUJB (Brasil), e pelo CERN (Suíça). Gostaríamos também de agradecer nossos colegas da colaboração RD1 pela contribuição na aquisição de dados e C. C. Jannuzzi para ajuda em parte da análise.

Referências

- [1] R. Wigmans, Advances in Hadron Calorimetry. Rev. Nucl. Part. Sci. 41, 133-145, 1991.
- [2] J. Badier et al, Nuclear Instrumentats and Methods, A 337 (1994) 326.
- [3] J. M. Seixas et al, Nuclear Instruments and Methods A314, 191-198 1992.
- [4] D. Acosta et al, "Electron-Pion Discrimination with a Scintillating Fiber Calorimeter", CERN, Janeiro, 1993.
- [5] L. Lonblad et al, Comp. Phys. Commun. **70** (1992) 167